



A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

DETERMINAREA GRAFO-ANALITICĂ PE BAZA FRECVENȚEI PROPRII A ADÂNCIMII DEFECTULUI LA BARE ÎNCASTRATE

Zeno-Iosif PRAISACH, Gilbert-Rainer GILLICH, Petru-Florin MINDA

GRAPHIC-ANALYTICAL METHOD FOR DAMAGE DEPTH DETERMINATION BASED ON NATURAL FREQUENCIES AT CANTILEVER BEAM

The paper presents research results of authors in determining of the damage depth for a cantilever beams by using natural frequencies. A graphic-analytical method is proposed which permit to evaluate the damage depth and localize the position of the damage on the beam length. The method is based on results obtained from the numerical modal analysis for the first ten modes of vibration. Experimental tests have confirmed the method and the results have application in non-destructive examination based on vibration analysis.

Keywords: natural frequencies, defect, depth, bar mixer

Cuvinte cheie: frecvențe proprii, defect, adâncime, bară încastrată

1. Introducere

Inspecția periodică și controlul structurilor de inginerie este necesară din punct de vedere al detectării defectelor în timp real și de a stabili siguranța și fiabilitatea structurii. Identificarea timpurie a defectelor în timpul vieții structurilor permite o mentenanță programată cu impact asupra reducerii costurilor de exploatare, sau repunerii în funcțiune și înlocuirea structurii pentru a evita accidente. În literatura de specialitate sunt tratate un număr mare de metode nedestructive.

Metodele dinamice sunt în măsură să indice apariția defectelor chiar și la structurile mari, dar oferă informații puține cu privire la caracteristicile defectului.

Un avantaj major al metodelor dinamice este legat de faptul că acestea nu necesită acces la zona afectată. Atât metodele nedistructive, cât și metodele dinamice nu se exclud, acestea putând fi utilizate complementar [1].

Defectele influențează comportamentul dinamic al structurilor, modificarea caracteristicilor mecanice și dinamice, cum ar fi: frecvențele naturale, forma modală, raportul de amortizare, rigiditatea sau flexibilitatea.

Detectarea defectelor folosind modificările de frecvențe naturale este în mare măsură prezentată în literatura de specialitate [2, 3 și 4].

Metodele bazate de modificarea frecvențelor se pot clasifica în două categorii: metode de detectare a defectelor și metode destinate în localizarea și cuantificarea defectelor.

În lucrare este prezentată o metodă originală grafo-analitică privind evaluarea și localizarea defectului pentru bare încastrate de secțiune dreptunghiulară.

Metoda se bazează pe un studiu amplu cu privire la comportamentul barei cu defect, care ne-a permis să stabilim modul în care se modifică frecvențele proprii funcție de poziția defectului. Prin urmare, spre deosebire de alți autori care au analizat comportamentul barei cu defect având în vedere un număr redus de moduri de frecvență (în general, una sau două), noi am implicat în această analiză primele zece moduri de vibrație.

Cercetările noastre complexe au arătat că modificarea de frecvență naturală pentru un anumit mod de vibrație depinde de poziția defectului pe grindă, fiind influențată de vectorul formei modale pentru o anumită locație, în timp ce adâncimea defectului doar amplifică acest fenomen.

Pe baza acestor observații, și prin introducerea noțiunii de abatere relativă în frecvență definită ca raportul dintre variația de frecvență și frecvența naturală pentru fiecare mod de vibrație, a fost posibil să fie identificate seturi de valori care caracterizează în mod unic comportamentul barei cu un defect dat.

Distinctiv de alte metode prezentate în literatura de specialitate, metoda propusă este ușor de aplicat și necesită un singur accelerometru pentru detectarea, localizarea și evaluarea defectelor. Aceasta poate fi pusă în aplicare printr-o procedură care nu implică acțiunea umană și care permite monitorizarea la distanță a structurilor.

2. Modelul analizat

Cercetările s-au efectuat pe o bară încastrată din material oțel (figura 1). Bara are lungimea $L = 1000$ mm, lățimea $b = 50$ mm și înălțimea $h = 5$ mm și în consecință aria transversală $A = 250 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ având și momentul de inerție $I = 520,833 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4$. Producătorul barei indică următorii parametrii pentru materialul barei: densitatea $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, modulul de elasticitate longitudinală Young $E = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ și coeficientul de contracție transversală Poisson $\nu = 0,3$.

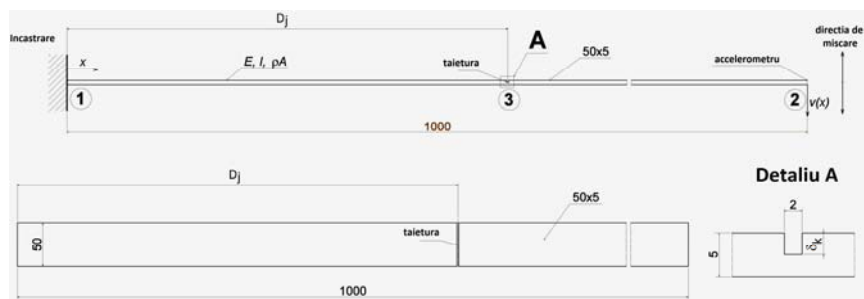


Fig. 1 Bara cu defect, încastrată

Se poate observa că defectul considerat este deschis având lățimea de 2 mm, practicat pe toată lățimea barei. Poziția defectului pe bară este notată cu D_j și ia valori de la 0 (zero) la L , iar pentru fiecare valoare D_j au fost analizate 9 (nouă) nivele de adâncime δ_k , respectiv 8 %, 17 %, 25 %, 33 %, 42 %, 50 %, 58 %, 67 % și 75 % din înălțimea (grosimea) barei. S-au stabilit 190 de locații D_j ale defectului pe toată lungimea barei. Locațiile au fost determinate din analiza primelor zece forme ale modurilor de vibrații, cum ar fi punctele în care forma trece prin zero, punctele de extrem ale formei, respectiv punctele de inflexiune. Pentru fiecare locație D_j , respectiv pentru fiecare adâncime δ_k s-au determinat frecvențele proprii pentru primele zece moduri de vibrație pe direcția de mișcare (figura 1), rezultând $D_j \times \delta_k = 190 \times 9 = 1710$ seturi de analize modale de efectuat, la fiecare set rezultând zece frecvențe proprii, deci în total 17100 frecvențe proprii determinate prin analiza modală. La aceste seturi de valori se adaugă și primele zece frecvențe proprii pentru bara fără defect ($\delta_0 = 0$ %).

Calculul modal prin metoda elementelor finite (MEF) s-a făcut pe un model 3D de bară încastrată, pentru primele 22 moduri de vibrație, din care s-au extras doar modurile de vibrație pe direcție verticală. Pentru discretizare s-au folosit elemente cu dimensiunea medie de 2 mm, fața corespunzătoare punctului ① (figura 1) s-a considerat fixă. Masa accelerometrului a fost neglijată. Datele de intrare pentru analiza modală se constituie soluțiile analizei statice. Pentru analiza statică s-a luat în calcul masa proprie a barei și temperatura mediului ambiant.

3. Descrierea metodei

Metoda implică utilizarea seturilor de date obținute din analiza statică și modală prin metoda elementelor finite, care reprezintă:

- primele zece frecvențe naturale obținute pentru bara fără defect;

- primele zece frecvențe naturale obținute pentru bara cu defect în diferite locații și cu diferite nivele de adâncime ale defectului;

- seturi de date obținute prin măsurători pe bara reală fără defect. Pentru măsurători este necesar un singur accelerometru.

Aceste seturi de valori trebuie apriori determinate pentru toate $f_{i-D_j\delta_k}^{FEM}$ frecvențe naturale și organizate într-o bază de date după modul de vibrație $i = 1...10$, locația defectului D_j și adâncimea δ_k . Baza de date include de asemenea și valorile frecvențelor naturale f_{i-U}^m pentru bara reală și valorile frecvențele naturale f_{i-U}^{FEM} pentru bara fără defect din analiza modală.

Am introdus noțiunea de abatere relativă în frecvență definită ca raportul dintre variația de frecvență și frecvența naturală pentru fiecare mod de vibrație.

Astfel, pentru cele $i \cdot j \cdot k$ cazuri rezultate se determină abaterea relativă a frecvenței, cu relația:

$$f_{i-D_j\delta_k}^{*FEM} = \frac{\Delta f_{i-D_j\delta_k}^{FEM}}{f_{i-U}^{FEM}} \cdot 100 = \frac{f_{i-U}^{FEM} - f_{i-D_j\delta_k}^{FEM}}{f_{i-U}^{FEM}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Abaterea relativă a frecvenței pentru primele zece (10) moduri de vibrație, pentru fiecare pereche D_j, δ_k determină un set unic de valori.

Reprezentând grafic abaterea relativă a frecvențelor proprii funcție de modurile de vibrații, obținem tendința abaterii relative pentru fiecare pereche D_j, δ_k .

Pentru evaluarea adâncimii defectului, trebuie să comparăm abaterea relativă a frecvențelor proprii determinată numeric cu abaterea relativă obținută din frecvențele naturale măsurate pe bara reală. Selectând din baza de date cele mai apropiate curbe ale tendinței abaterii relative funcție de locația și adâncimea defectului și încadrând abaterea relativă a frecvențelor naturale pentru bara reală cu defect între două astfel de curbe, obținem atât locația defectului cât și adâncimea lui.

4. Aplicarea metodei

În figura 2 este prezentată abaterea relativă măsurată pentru bara reală cu defect încadrată între curbele de tendință a abaterii relative pentru bara cu defect numeric determinate, defect situat la $D_j = 577$ mm și adâncimea defectului $\delta_k = 50$ %, $D_j = 577$ mm și $\delta_k = 75$ %, respectiv $D_j = 587$ mm și $\delta_k = 50$ %, $D_j = 587$ mm și $\delta_k = 75$ %.

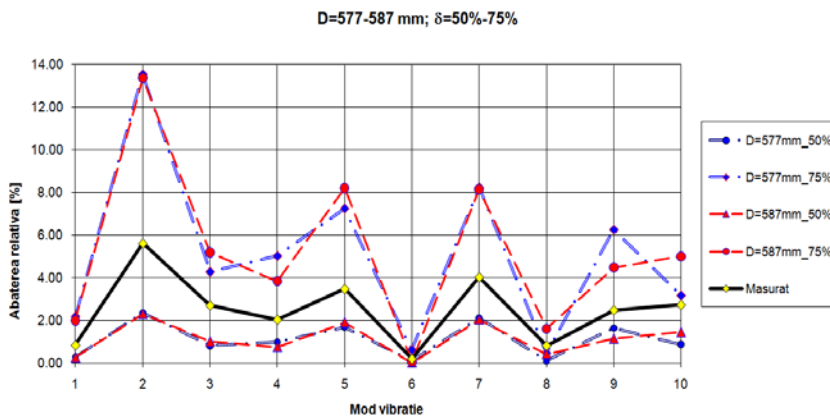


Fig. 2 Localizarea poziției defectului pe bara reală

Liniile care unesc abaterile relative ale frecvențelor (figura 2) între două moduri de vibrație consecutivă nu au semnificație fizică, ele marchează tendința abaterii relative de la un mod la altul. Din figură se poate observa că abaterea relativă măsurată se apropie cel mai bine de alura abaterii relative pentru bara (numeric determinată) cu defectul

localizat la $D_j = 587$ mm, iar adâncimea defectului, într-o primă aproximare, se încadrează între $\delta_k = 50\%$ și 75% din înălțimea barei.

O dată stabilită locația defectului se trece la evaluarea adâncimii. În figura 3, aceeași abatere relativă măsurată (din figura 2) este încadrată între nivelele de adâncime ale defectului de $\delta_k = 58\%$ și $\delta_k = 67\%$. Cum înălțimea barei considerate are 5 mm, rezultă că adâncimea reală a defectului este cuprinsă între 2,9 și 3,35 mm, iar localizarea ei este la 587 mm de încastrare.

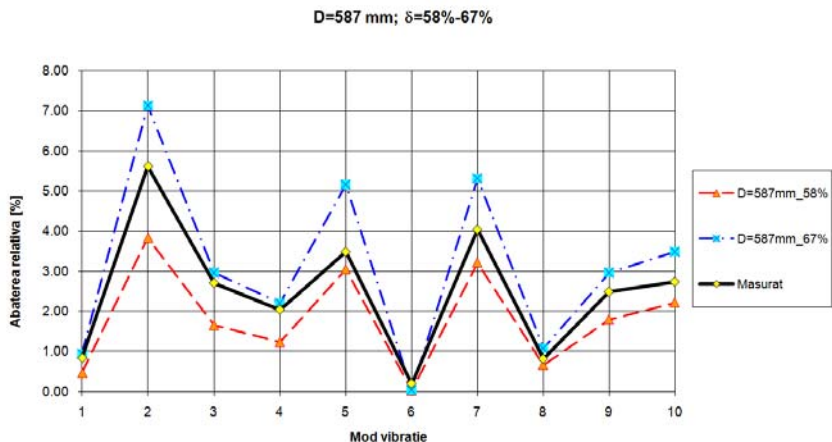


Fig. 3 Determinarea adâncimii defectului

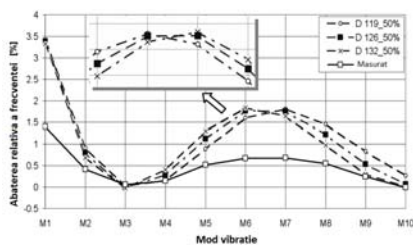


Fig. 4.a Identificare poziție defect

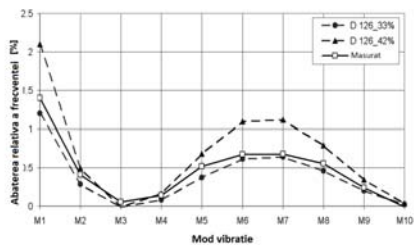


Fig. 4.b Evaluare adâncime defect

În figura 4, a este prezentată localizarea defectului prin compararea abaterii relative măsurate cu curbele abaterii relative calculate cu adâncimea defectului la 50 %, respectiv evaluarea adâncimii defectului (figura 4, b) între valorile de 33 % și 42 % din

înălțimea barei pentru defectul localizat la 126 mm de punctul de încastrare.

Figura 5 prezintă rezultatele obținute pe o bară cu defectul localizat la distanța de 569 mm față de încastrare la care în cazul 1 (figura 5, a) a fost materializat un defect cu adâncimea mai mică de 50 %, iar în cazul doi (figura 5, b), defectul a fost adâncit peste 50 % din înălțimea barei.

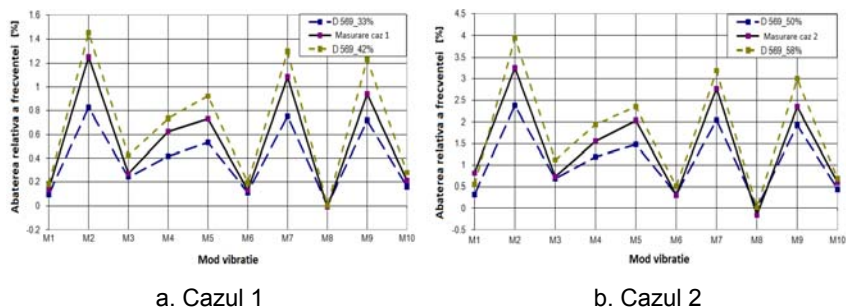


Fig. 5 Evaluare adâncime defect

Se poate observa, în cazul 1, că abaterea relativă a frecvențelor proprii măsurată pe bara reală se încadrează între abaterile relative calculate cu adâncimea defectului de 33 %, respectiv 42 %, iar în cazul 2, după creșterea adâncimii defectului pe bara reală, aceasta a fost încadrată între 50 % și 58 % din înălțimea barei.

5. Concluzii

■ Metoda propusă în lucrarea de față, aplicabilă la bare cu defecte deschise, se bazează pe anumite fenomene caracteristice pentru comportamentul dinamic al barelor, subliniate ca rezultat al mai multor studii analitice, numerice și experimentale dezvoltate de autori.

■ Pentru bare încastrate cu defect, metoda propusă de autori pentru localizarea și evaluarea defectului oferă o soluție unică, iar pentru bare simetric rezemate, metoda oferă două soluții simetrice dintre care numai una este corectă.

■ Metoda propusă în lucrare a permis localizarea defectului, cu o precizie de aproximativ 1 %, fără a necesita condiții de laborator deosebite, deoarece presupune utilizarea unui singur accelerometru și este adecvată pentru aplicații practice.

Mulțumiri. Autorii mulțumesc pentru sprijinul acordat de Fondul Social European Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane (FSE POSDRU), prin Ministerul Muncii, Familiei și Protecției Sociale prin cofinanțarea proiectului “Excelență în cercetare prin programe postdoctorale în domenii prioritare ale societății bazate pe cunoaștere (EXCEL)” POSDRU/89/1.5/S/62557.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Balageas, D., Fritzen, C.P., Güemes, A., *Structural health monitoring*, ISTE Ltd, London, 2006.
- [2] Cawley, P., Adams, R.D., *The location of defects in structures from measurements of natural frequencies*. Journal of Strain Analysis, 14(2), 1979, pag. 49-57.
- [3] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W., *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review*, Reprot No. LA 13070-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1996.
- [4] Salawu, O.S., *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*, *Engineering Structures*, 19(9), 1997, pag. 718-723.
- [5] Morassi, A., Vestroni, F., *Dynamic Methods for Damage Detection in Structures*, CISM Courses and Lectures, Vol. 499, Springer Wien New York, 2008.
- [6] Zhou, Z., *Vibration-Based Damage Detection of Simple Bridge Superstructures*, Doctoral Thesis University of Saskatchewan, 2006.
- [7] Friswell, M.I., Mottershead, J.E., *Finite element model updating in structural dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1995.

Dr.Ing. Zeno-Iosif PRAISACH,
șef departament S.C. Hydro Engineering S.A. Reșița
e-mail: zpraisach@yahoo.com
Prof.Univ.Dr.Ing.Ec. Gilbert-Rainer GILLICH,
prorector învățământ Universitatea "Eftimie Murgu" Reșița,
președinte Sucursalei AGIR Caraș-Severin
e-mail: gr.gillich@uem.ro
Drd. mat. Petru-Florin MINDA,
cadru asociat, Universitatea "Eftimie Murgu" Reșița
e-mail: f.minda@uem.ro